

Uji Statistik Pengaruh Perlakuan Permukaan terhadap Umur Fatik dengan Data Terbatas (Agus Suhartono)

Akreditasi LIPI Nomor : 536/D/2007

Tanggal 26 Juni 2007

UJI STATISTIK PENGARUH PERLAKUAN PERMUKAAN TERHADAP UMUR FATIK DENGAN DATA TERBATAS

Agus Suhartono

*Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS)-BPPT
Kawasan Puspiptek, Serpong 15314, Tangerang*

ABSTRAK

UJI STATISTIK PENGARUH PERLAKUAN PERMUKAAN TERHADAP UMUR FATIK DENGAN DATA TERBATAS. Penentuan pengaruh dua atau lebih parameter pada kekuatan fatik bahan terkadang sulit dilakukan karena distribusi data yang bersifat menyebar. Uji statistik dapat mempermudah evaluasi perubahan karakteristik bahan sebagai hasil dari suatu proses pengerjaan yang berpengaruh pada kekuatan fatik secara signifikan. Pada penelitian ini dilakukan uji statistik pada data hasil pengujian fatik benda uji baja *AISI 1045*. Benda uji terdiri atas 4 kelompok. Pertama adalah benda uji yang tidak mengalami perlakuan permukaan, kedua dan ketiga adalah benda uji yang mengalami proses *shot peening* dengan 15 intensitas Almen dan 16 intensitas Almen serta kelompok keempat adalah benda uji yang mengalami karburisasi. Uji fatik dilakukan pada tiga tingkat pembebanan. Data-data kemudian dipetakan pada diagram S-N (beban terhadap jumlah siklus). Prosedur perhitungan dengan metode transformasi dilakukan dari tiga tingkat pembebanan menjadi satu tingkat pembebanan. Uji statistik yang diterapkan pada data-data tersebut menunjukkan bahwa proses *shot peening* dan karburisasi memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan kekuatan fatik benda uji. Sedangkan penambahan waktu *shot peening* yang mengakibatkan kenaikan intensitas dari 15 intensitas Almen (kelompok benda uji kedua) menjadi 16 intensitas Almen (kelompok benda uji ketiga) tidak menaikkan kekuatan fatik benda uji secara signifikan.

Kata kunci : Uji statistik, Umur fatik, *AISI 1045*, *Shot peening*, Karburisasi

ABSTRACT

THE STATISTIC TEST ON INFLUENCE OF SURFACE TREATMENT TO FATIGUE LIFETIME WITH LIMITED DATA. Justifications on the influences of two or more parameters on fatigue strength are some times problematic due to the scatter nature of the fatigue data. Statistic test can facilitate the evaluation, whether the changes in material characteristics as a result of specific parameters of interest is significant. The statistic tests were applied to fatigue data of *AISI 1045* steel specimens. The specimens are consisted of as received specimen, shot peened specimen with 15 and 16 Almen intensity as well as carburized specimen. The fatigue tests of the specimens are conducted in three levels of loading. The fatigue data are then described by S-N diagrams (Stress-Cycles to Failure diagrams). A transformation to one stress level is carried out due to limited amount of the fatigue data. Statistic tests, which are applied to the data, show that the shot peening and carburization process provide a significant effect to the fatigue strength of the specimen. However additional time in shot peening process with the purpose of increasing the shot peening intensity has no significant effect to the increasing of fatigue strength of the steel specimens.

Key words : Statistic test, Fatigue lifetime, *AISI 1045*, Shot peening, Carburization

PENDAHULUAN

Pengujian fatik sering digunakan untuk membandingkan karakteristik mekanik material dengan tujuan mengetahui pengaruh kombinasi dari parameter-parameter tertentu terhadap perilaku kekuatan fatik. Kelompok-kelompok benda uji dengan jumlah yang kecil memiliki perbedaan nilai rata-rata satu dengan yang lain. Penentuan perbedaan yang diakibatkan oleh pengaruh parameter-parameter tersebut secara tegas kadang sukar dilakukan dengan hanya melihat data dan hasil pengujian yang diberikan dalam tabel atau

grafik. Oleh karena itu dilakukan suatu perhitungan statistik berupa analisis varian untuk menguji signifikansi efek parameter-parameter yang diberikan.

Analisis varian digunakan untuk penelitian pengaruh suatu perlakuan tertentu yang bersifat kualitatif pada kelompok benda uji dan pengaruh tersebut diamati dari nilai hasil pengujian yang bersifat kualitatif. Sebagai contoh akan diselidiki pengaruh perlakuan permukaan terhadap unjuk kerja benda uji yang diuji fatik di

laboratorium. Pengaruh dari proses perlakuan tersebut diamati secara kuantitatif berupa umur fatik (jumlah siklus hingga rusak).

TEORI

Kekuatan fatik sangat berhubungan dengan statistik karena datanya yang terdistribusi. Kekuatan komponen yang sama pada saat diuji memberikan hasil yang berbeda dengan mengikuti distribusi statistik tertentu. Hasil pengujian fatik dari benda uji tersebut kemudian diolah untuk menghasilkan kurva S-N (tegangan-jumlah siklus tegangan).

Hasil uji fatik umumnya dipetakan pada sumbu logaritma ganda (log-log). Penggambaran tersebut sesuai dengan dasar teori yaitu persamaan *Coffin-Manson* untuk kurva regangan terhadap jumlah siklus [1, 2] dan persamaan *Paris* untuk perambatan retak [3]. Koordinat pada kurva S-N seperti pada Gambar 1 terdiri atas Tegangan amplitudo (S_a) sebagai ordinat dan jumlah Siklus Tegangan (N) sebagai absis.

Kurva S-N hasil pengujian fatik pada daerah kekuatan fatik siklus tinggi dapat didekati dengan persamaan *Basquin* [1] :

$$N = C_a \cdot S_a^{-k} \quad (1)$$

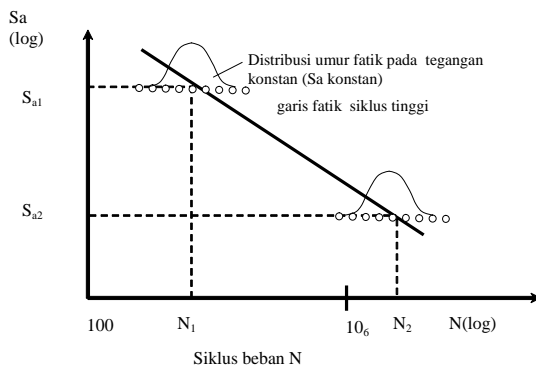
dengan :

- N = Jumlah siklus hingga patah (umur fatik)
- S_a = Tegangan amplitudo
- C_a = Konstanta (titik potong antara kurva S-N dan sumbu ordinat S_a).
- k = Gradien kurva S-N

Bila kedua sisi dari Persamaan 1 dilogaritmakan maka menjadi :

$$\log N = C_a - k \cdot \log S_a \quad (2)$$

Persamaan ini pada kurva logaritma ganda berupa garis lurus dengan kemiringan (*gradien*) k . Apabila kurva S-N melewati dua titik berkoordinat (N_1, S_{a1}) dan (N_2, S_{a2}), maka besar *gradien* (k) diberikan oleh Persamaan 3 sebagai berikut :



Gambar 1. Kurva S-N hasil pengujian fatik

$$k = \frac{\log(N_2 / N_1)}{\log(S_{a1} / S_{a2})} \quad (3)$$

Persamaan 3 di atas dapat dituliskan

$$N_1 = N_2 \left(\frac{S_{a1}}{S_{a2}} \right)^{-k} \quad (4)$$

Pengujian statistik digunakan untuk menguji perbedaan nilai rata-rata dari 2 kelompok benda uji atau lebih merupakan pengaruh dari parameter perlakuan yang diberikan atau hanya merupakan penyimpangan biasa akibat sifat random kumpulan benda uji tersebut. Sifat random benda uji merupakan sifat alami yang menyertai benda uji yang disebabkan oleh proses pembuatan bahan, permesinan benda uji, atau sebaran alami akibat proses pengujian [4-6].

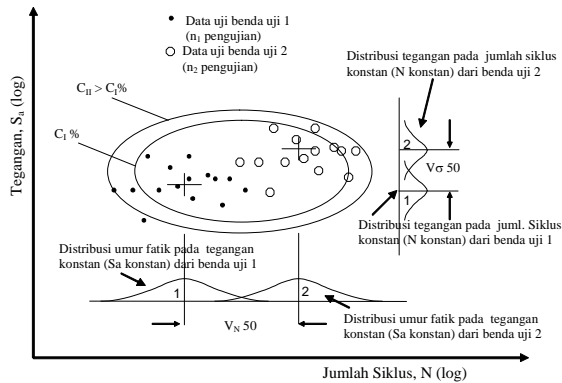
Pada pengujian statistik dapat diketahui nilai kritis yang membatasi perbedaan antara nilai rata-rata dari kelompok-kelompok benda uji dengan membandingkan nilai-nilai tersebut terhadap suatu nilai dari tingkat kepercayaan yang telah ditetapkan. Apabila nilai kritis tersebut terlewati maka perbedaan yang ditemukan pada pengujian adalah signifikan dan membuktikan bahwa pemberian variabel tertentu terhadap sekelompok benda uji memiliki pengaruh yang berarti terhadap karakteristik awal benda uji tersebut [4, 6].

Pelaksanaan analisis varian memerlukan syarat karakteristik kuantitatif benda uji yang diukur memiliki distribusi normal atau logaritma normal, seperti : kuat tarik, kekerasan dan umur fatik.

Gambar 2 menunjukkan diagram hasil uji fatik dari dua kelompok benda uji. Dalam pengujian, benda uji dibebani dengan tegangan dinamis dengan amplitudo tegangan tertentu (S_a) hingga benda uji mengalami patah dan umur fatik atau jumlah siklus pembebanan hingga patah (N) diketahui. Pengujian dilakukan pada beberapa benda uji dengan amplitudo tegangan (S_a) yang berbeda-beda. Jumlah siklus pembebanan hingga patah memiliki sebaran yang terdistribusi, sehingga walaupun pada pembebanan dengan amplitudo tegangan yang sama dapat menghasilkan umur fatik yang berlainan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Confidence interval, V memberikan informasi besar probabilitas bahwa nilai rata-rata dan standar deviasi yang diharapkan, berada dalam interval tersebut. Dari Gambar 2, V_{N50} menyatakan bahwa pada interval tersebut 50% kelompok benda uji 1 dan 50% kelompok benda uji 2 memiliki nilai rata-rata umur fatik dan standar deviasi umur fatik terletak pada *confidence interval* tersebut. $V_{\sigma50}$ menyatakan bahwa pada interval tersebut 50% nilai rata-rata dan standar deviasi kelompok benda uji 1 dan benda uji 2 memiliki tegangan amplitudo terletak pada *confidence interval* tersebut.

Prosedur perhitungan uji statistik dimulai dengan perhitungan nilai rata-rata dari kedua kelompok benda uji. Bila memiliki nilai rata-rata yang berbeda maka



Gambar 2. Interval kepercayaan V (confidence interval) dengan probabilitas C_i untuk simpangan dan nilai rata-rata dari dua kelompok benda uji [7].

perbedaan tersebut perlu diketahui disebabkan oleh sifat random dari kedua kelompok benda uji yang mungkin masih termasuk dalam satu distribusi logaritma normal atau berasal dari dua buah distribusi logaritma normal yang berbeda.

Tahap selanjutnya dilakukan analisis varian, dengan langkah sebagai berikut, pertama dihitung jumlah seluruh benda uji dari kedua kelompok benda uji, jumlah kelompok benda uji yang dibandingkan $-z$ dan derajat kebebasan γ_1, γ_2 dengan rumus,

$$\gamma_1 = z - 1, \gamma_2 = n - z \quad \dots\dots\dots (5)$$

Kemudian dihitung jumlah benda uji kelompok i , n_i berdasarkan rumus

$$n = n_1 + n_2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

Rata-rata logaritma jumlah siklus (umur) benda uji gabungan :

$$\bar{x} = \frac{1}{2}(\bar{x}_1 + \bar{x}_2) \quad \dots\dots\dots (7)$$

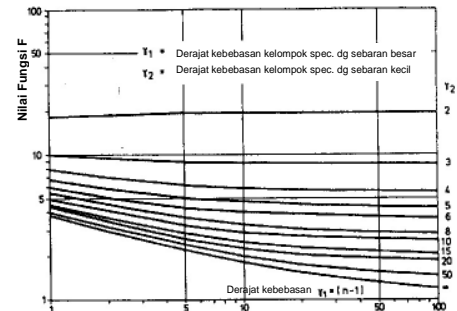
Jumlah kuadrat perbedaan nilai antara rata-rata logaritma jumlah siklus (umur) benda uji kelompok 1 dengan logaritma umur benda uji ke i dari kelompok 1 dan rata-rata logaritma jumlah siklus (umur) benda uji kelompok 2 dengan logaritma umur benda uji ke i dari benda uji kelompok 2, berdasarkan rumus:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta x)_1^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta x)_2^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

Selanjutnya dihitung nilai fungsi uji berdasarkan rumus :

$$F_{uji} = \frac{\gamma_2 \cdot \sum [n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2]}{\gamma_1 \sum \sum (\Delta x)_i^2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

Nilai fungsi $F_{\gamma_1, \gamma_2, c}$ ditentukan dari Gambar 3 yang menunjukkan probabilitas dengan tingkat kepercayaan C 95% atau tabel distribusi F [9]. Penentuan hasil uji statistik dilakukan dengan membandingkan besar nilai F_{uji} dan besar nilai fungsi $F_{\gamma_1, \gamma_2, c}$. Bila $F_{uji} < F_{\gamma_1, \gamma_2, c}$



Gambar 3. Penelitian standar deviasi dua kelompok benda uji terhadap tingkat signifikan 95% [8].

maka perbedaan nilai rata-rata terjadi secara kebetulan atau perbedaan tersebut hanya disebabkan oleh sifat random dari distribusi kedua kelompok benda uji. Kebalikannya apabila $F_{uji} > F_{\gamma_1, \gamma_2, c}$ maka perbedaan nilai rata-rata tersebut adalah signifikan.

Pada pengujian fatik didapatkan data-data berupa pasangan antara amplitudo tegangan S_a dan umur fatik N . Pada Gambar 2 ditunjukkan hasil pengujian fatik dari 2 kelompok benda uji yang berbeda. Data-data hasil pengujian fatik seperti pada Gambar 2 tersebut, tidak dapat dianalisis secara langsung karena memiliki karakteristik kualitatif. Pada Gambar 3 ditunjukkan bahwa pada data-data tersebut dapat dilakukan transformasi pada tingkat tegangan yang sama agar memungkinkan dilakukan perhitungan selanjutnya.

Proses transformasi dilakukan dengan menggeser data-data pengujian sejajar dengan gradien kemiringan kurva $S-N$ (k) menuju suatu tingkat garis yang memiliki tegangan amplitudo (S_a) konstan seperti ditunjukkan pada Gambar 4 atau garis yang memiliki umur fatik konstan seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

Daerah garis miring kurva $S-N$ diketahui memiliki persamaan sesuai dengan Persamaan 4,

$$N_1 = N_2 \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{-k}$$

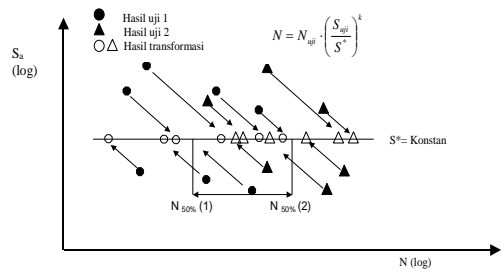
Persamaan tersebut dapat diubah menjadi :

$$N_1 = N_2 \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^k \quad \dots\dots\dots (10)$$

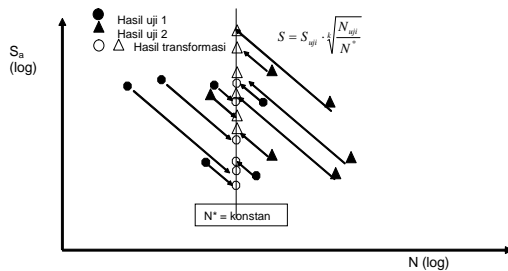
dengan gradien adalah k .

Transformasi pada satu garis horizon dengan amplitudo tegangan konstan S^* dilakukan dengan menggeser titik hasil pengujian yang memiliki koordinat (N_{uji}, S_{uji}) dengan arah kemiringan k menuju titik koordinat (N, S^*) dengan persamaan yang serupa dengan Persamaan 10. Untuk mendapatkan besar jumlah siklus (N) seperti yang tertulis pada Gambar 4 digunakan rumus :

$$N = N_{uji} \left(\frac{S_{uji}}{S^*} \right)^k \quad \dots\dots\dots (11)$$



Gambar 4. Transformasi pada satu tingkat tegangan S^* [4]



Gambar 5. Transformasi pada satu garis tingkat umur fatik N^* [4]

Sedangkan transformasi pada satu garis *horizon* dengan umur atau jumlah siklus konstan N^* dilakukan dengan menggeser titik hasil pengujian yang memiliki koordinat (N_{uji}, S_{uji}) dengan arah kemiringan k menuju titik koordinat (N^*, S) dengan persamaan yang serupa dengan Persamaan 11. Untuk mendapatkan besar tegangan amplitudo (S) seperti yang tertulis pada Gambar 5 digunakan rumus :

$$S = k \cdot N_{uji} \left(\frac{S_{uji}}{N^*} \right) \dots\dots\dots (12)$$

Langkah yang diperlukan untuk analisis varian yaitu tersedianya dua atau lebih kelompok benda uji yang satu sama lain tidak berhubungan dan tersebar di sekitar nilai rata-ratanya. Nilai rata-rata dari setiap kelompok benda uji tersebut tersebar di sekitar nilai rata-rata gabungan kedua kelompok benda uji. Sebaran dari nilai rata-rata gabungan dibandingkan dengan sebaran nilai rata-rata masing-masing kelompok benda uji. Bila sebaran nilai rata-rata gabungan memiliki nilai yang lebih besar dari nilai rata-rata sebaran masing-masing kelompok benda uji, maka rata-rata salah satu kelompok benda uji berbeda dari kelompok benda uji yang lain dengan suatu tingkat signifikan C . Bila perbedaan dalam sebaran tidak melewati batas signifikan C , maka perbedaan nilai rata-rata hanya murni merupakan suatu kebetulan, atau sifat random dari kelompok benda uji tersebut. Tetapi bila perbedaan dalam sebaran melewati batas signifikan C , maka perbedaan tersebut signifikan yang menandakan bahwa kedua kelompok benda uji berasal dari dua kelompok distribusi normal yang berlainan. Pada penelitian yang berhubungan dengan pengujian dan umur fatik penggunaan nilai $C = 95\%$ dianggap cukup layak dan mencukupi [10].

METODE PERCOBAAN

Uji statistik dilakukan pada kelompok-kelompok pengujian fatik material *AISI 1045* yang telah mengalami berbagai jenis perlakuan permukaan dengan rincian sebagai berikut:

1. Kelompok benda uji *AISI 1045* yang tidak mengalami perlakuan permukaan sebagai standar, dengan jumlah benda uji untuk uji fatik 15 buah.
2. Kelompok benda uji *AISI 1045* yang telah mengalami proses perlakuan *shot peening* dengan intensitas 15 skala Almen, dengan jumlah benda uji untuk uji fatik 15 buah.
3. Kelompok benda uji *AISI 1045* yang telah mengalami proses perlakuan *shot peening* dengan intensitas 16 skala Almen, dengan jumlah benda uji untuk uji fatik 12 buah.
4. Kelompok benda uji yang telah mengalami proses karburisasi dengan kedalaman karburisasi 1 mm, dengan jumlah benda uji untuk uji fatik 15 buah.

Material awal berupa silinder pejal baja *AISI 1045* berdiameter 14 mm. Bahan ini banyak digunakan untuk pembuatan komponen kendaraan seperti poros dan baut kekuatan menengah hingga tinggi. Komposisi material diuji dengan metode spektrometer yaitu C 0,44, Si 0,23, Mn 0,62, P 0,008, S 0,03, Cu 0,17, Ni 0,09, Cr 0,057. Material tersebut kemudian dibubut untuk pembentukan menjadi benda uji fatik dan pada pengerjaan akhir dilakukan pemolesan halus. Pengujian kekasaran permukaan pada benda uji menunjukkan kekasaran permukaan 0,3 mm.

Kelompok benda uji II dan III dilakukan proses *shot peening* di PT Showa Manufacturing dengan mesin *rotary blades*, tipe TB-100L (NICCHU CORP. Ltd.) Kelompok benda uji II dilakukan *shot peening* selama 7,5 menit dan kelompok benda uji III dilakukan *shot peening* selama 15 menit. Perbedaan waktu perlakuan tersebut mengakibatkan perbedaan intensitas *peening* antara keduanya. Kelompok benda uji II memiliki intensitas sebesar 15 skala Almen sedangkan kelompok benda uji III memiliki intensitas sebesar 16 skala Almen. Intensitas *shot peening* diukur dengan menggunakan plat Almen. Bila plat Almen mengalami *shot peening*, tegangan sisa tekan menyebabkan plat Almen melengkung ke arah sisi yang mengalami *shot peening* dan tinggi lengkungan tersebut diukur untuk menentukan intensitas dari proses *shot peening* [11,12]. Pemilihan intensitas ini dilakukan berdasarkan pertimbangan praktis yang dilakukan di pabrik PT Showa Manufacturing yaitu 7,5 menit. *Shot peening* hingga 15 menit dilakukan untuk mengetahui pengaruh perpanjangan waktu terhadap intensitas dan kekuatan bahan. Keterbatasan benda uji, keterbatasan waktu penggunaan mesin *shot peening* di PT Showa Manufacturing serta waktu pengujian fatik yang panjang membatasi jumlah kelompok benda uji *shot peening* yang

diteliti sehingga hanya dilakukan terhadap kelompok II (7,5 menit) dan kelompok III (15 menit).

Kelompok benda uji IV dilakukan perlakuan panas karburisasi dengan kedalaman lapisan karburisasi mencapai 1 mm dengan menggunakan media karburisasi berupa arang aktif padat.

Keempat kelompok benda uji tersebut kemudian dilakukan pengujian fatik dengan metode pembebanan putar tekuk. Hasil pengujian masing-masing kelompok benda uji kemudian diolah dengan metode perhitungan data fatik, metode transformasi dan pengujian statistik untuk mengetahui efektifitas masing-masing perlakuan permukaan tersebut terhadap peningkatan kekuatan material terhadap beban fatik.

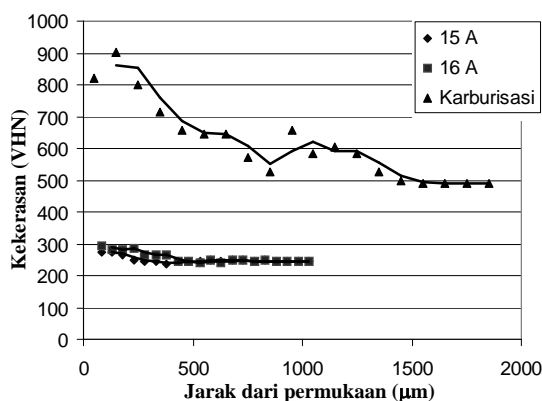
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian sifat mekanis masing-masing kelompok benda uji baja AISI 1045 diberikan pada Tabel 1 dan Gambar 6.

Dari hasil pengujian ini diketahui bahwa proses *shot peening* tidak meningkatkan kekuatan luluh dan kekuatan tarik bahan. Proses ini hanya sedikit meningkatkan kekerasan dari lapisan permukaan. Sedangkan proses karburisasi dapat meningkatkan baik kekuatan tarik, kuat luluh dan kekerasan bahan. Dari grafik uji kekerasan diketahui lapisan permukaan yang terbentuk akibat proses karburisasi adalah sedalam 1,05 mm. Kedalaman ini ditentukan berdasarkan kekerasan yang melebihi 550 VHN.

Tabel 1. Sifat mekanis benda uji

No	Benda Uji	VHN	σ_y MPa	σ_u MPa	Kekasaran (μm)
1	Tanpa perlakuan	Lihat Gambar 4	476	761	0,3
2	Shot peening 15 A	Lihat Gambar 4	476	766	5,1
3	Shot peening 16 A	Lihat Gambar 4	471	761	5,0
4	Karburisasi	Lihat Gambar 4	793	1136	0,3



Gambar 6. Distribusi kekerasan pada benda uji hasil *shot peening* dan karburisasi

Hasil Uji Fatik dan Transformasi pada Satu Horison Tegangan

Pada penelitian ini benda uji dibagi menjadi 4 kelompok. Sebagai kelompok acuan ditentukan kelompok benda uji yang belum dilakukan perlakuan permukaan. Pada pengujian umur fatik umumnya penentuan derajat signifikan dengan tingkat kepercayaan 95% sudah memberikan hasil yang baik [8,12]. Pada pemaparan hasil selanjutnya dihitung tingkat signifikan dari masing-masing perlakuan permukaan terhadap bahan awal. Pada penelitian ini semua benda uji dibebani dengan tegangan yang memiliki rasio tegangan maksimum-minimum sama, bila dibandingkan antara satu dengan lainnya.

Hasil pengujian umur fatik siklus tinggi pada 1 kelompok benda uji tanpa perlakuan dan 3 kelompok benda uji yang telah mengalami perlakuan yang berbeda, dibandingkan dan dinilai apakah perbedaan umur fatik yang terjadi cukup signifikan.

Data hasil pengujian fatik dari keempat kelompok benda uji tersebut diberikan pada Tabel 2. Pengujian fatik untuk masing-masing kelompok dilakukan pada 3 tingkat pembebanan. Data pengujian berupa tingkat tegangan yang dipetakan pada sumbu Y dan jumlah siklus hingga patah (umur fatik) dipetakan pada sumbu X. Hasil pengujian fatik umumnya terdistribusi secara logaritma normal, sehingga pada penelitian ini data yang diolah berupa data logaritma dari jumlah siklus, $N(\log N)$ seperti yang ditampilkan pada Gambar 7.

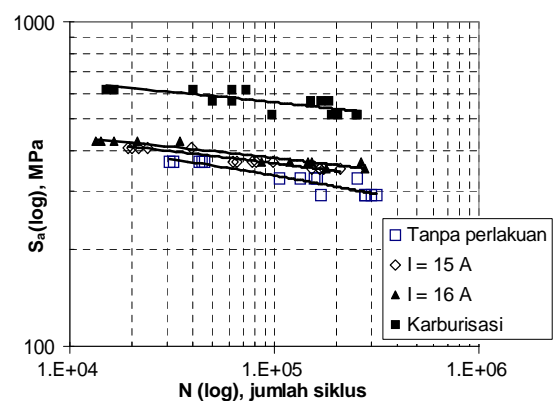
Data-data dari keempat kelompok benda uji yang berbeda tersebut kemudian masing-masing dilakukan perhitungan untuk mengetahui siklus hingga patah dengan probabilitas 50%, yang kemudian dilakukan regresi dengan hasil berupa bentuk persamaan sebagai berikut :

Benda uji standar

$$\sigma_{50\%} = 79,35 - 9 \cdot \log N \quad (13)$$

Benda uji *shot peened* I = 15A

$$\sigma_{50\%} = 71,52 - 6,9 \cdot \log N \quad (14)$$



Gambar 7. Kurva S-N hasil pengujian fatik dari 4 kelompok benda uji yang diteliti

Tabel 2. Data hasil pengujian fatik untuk 4 kelompok benda uji

Benda Uji Tanpa Perlakuan		Benda Uji Uji Shot Peening I = 15 A		Benda Uji Shot Peening I = 16 A		Benda Uji Karburisasi	
σ (Mpa)	Umur Fatik (siklus beban)	σ (Mpa)	Umur Fatik (siklus beban)	σ (Mpa)	Umur Fatik (siklus beban)	σ (Mpa)	Umur Fatik (siklus beban)
371	30.500	410	19.300	429	13.300	620	15.100
	32.200		20.000		14.100		16.400
	42.800		21.500		16.500		40.000
	44.100		24.100		21.200		62.000
	45.500		39.500		34.400		72.600
328	106.300	371	62.600	371	87.000	573	50.000
	134.700		65.500		119.400		62.000
	157.500		77.700		146.300		151.000
	160.600		81.400		151.700		169.000
	254.500		99.000		263.800		185.000
292	170.000	351	153.000	351		515	97.500
	276.200		166.100				191.000
	276.900		167.600		179.600		203.000
	296.700		172.800		277.000		250.000
	316.700		208.800				253.000

Benda uji *shot peened* I = 16A

$$\sigma_{50\%} = 71,74 - 6,6 \cdot \log N \quad (15)$$

Benda uji karburisasi

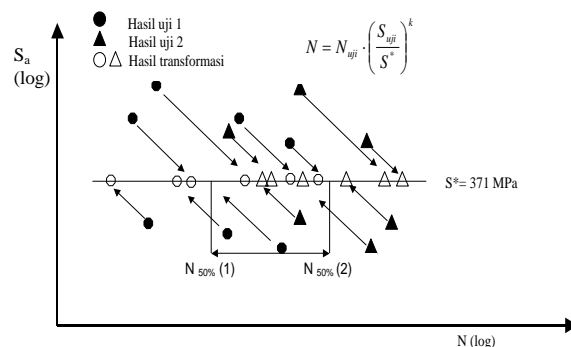
$$\sigma_{50\%} = 120,6 - 12,8 \cdot \log N \quad (16)$$

Selanjutnya dilakukan transformasi data dari hasil pengujian fatik masing-masing kelompok benda uji tersebut. Data pengujian fatik yang terdiri dari tiga tingkat pembebanan kemudian ditransformasikan menjadi hanya satu tingkat pembebanan.

Transformasi tersebut dilakukan, mula-mula dengan menentukan satu tingkat tegangan untuk mempermudah perbandingan kekuatan fatik dari masing-masing kelompok benda uji seperti diperlihatkan pada Gambar 8.

Pada perhitungan ini tegangan yang diambil sebagai acuan untuk transformasi data pengujian fatik dari keempat kelompok benda uji adalah 371 MPa dengan pertimbangan bahwa tingkat tegangan tersebut digunakan pada pengujian kelompok benda uji I, II dan III, sedangkan untuk kelompok benda uji IV walaupun tingkat tegangan ini tidak digunakan masih dapat dilakukan perhitungan lanjutan dengan metode ekstrapolasi data yang ada. Hasil dari perhitungan tranformasi ditunjukkan pada Tabel 3.

Dari hasil transformasi umur terhadap 1 tingkat tegangan yang konstan tersebut, kemudian dilakukan perhitungan pengujian statistik untuk mengetahui tingkat signifikansi dari perlakuan permukaan yang diberikan pada masing-masing kelompok benda uji. Sebagai contoh perhitungan, dilakukan analisis terhadap kelompok benda uji yang tidak mengalami perlakuan permukaan sebagai acuan dan dibandingkan dengan



Gambar 8. Transformasi pada satu horizon tegangan $S^* = 371$ MPa

Tabel 3. Data hasil transformasi pengujian pada satu horizon tegangan $S^* = 371$ MPa

No	Umur Fatik Benda Uji Tanpa Perlakuan (siklus beban)	Umur Fatik Benda Uji Shot Peening I = 15 A (siklus beban)	Umur Fatik Benda Uji Shot Peening I = 16 A (siklus beban)	Umur Fatik Benda Uji Karburisasi (siklus beban)
1	30.500	38.467	34.690	10.804.496
2	32.200	39.862	36.776	11.734.685
3	42.800	42.852	43.036	28.621.183
4	44.100	48.034	55.295	44.362.833
5	45.500	78.727	89.724	51.947.446
6	35.077	62.600	87.000	13.042.568
7	44.449	65.500	119.400	16.172.785
8	51.973	77.700	146.300	39.388.557
9	52.996	81.400	151.700	44.083.881
10	83.982	99.000	263.800	48.257.503
11	19.702	104.383	124.585	6.488.602
12	32.011	113.321	192.149	12.711.004
13	32.092	114.344		13.509.601
14	34.387	117.892		16.637.440
15	36.705	142.452		16.837.089

salah satu kelompok benda uji yang telah mengalami proses perlakuan permukaan, yaitu *shot peening* dengan intensitas 15 A. Selanjutnya prosedur perhitungan untuk perbandingan hasil pengujian dari kelompok-kelompok benda uji yang lain dilakukan indentik dengan prosedur perhitungan contoh ini.

Hasil perhitungan dari tiga tingkat horizon tegangan yang ditransformasikan pada satu tingkat horizon tegangan 371 MPa beserta perhitungan logaritma dari jumlah siklus ditunjukkan pada Tabel 4.

Pengujian Statistik

Perhitungan nilai rata-rata dari kedua kelompok benda uji, seperti yang tercantum pada Tabel 4, menunjukkan bahwa kedua kelompok benda uji tersebut memiliki nilai rata-rata yang berbeda. Perbedaan tersebut perlu diketahui hanya disebabkan oleh sifat random dari kedua kelompok benda uji yang mungkin masih termasuk dalam satu distribusi logaritma normal atau berasal dari dua buah distribusi logaritma normal yang berbeda.

Perhitungan selanjutnya harus dilakukan untuk mengetahui hal tersebut dengan melakukan analisis varian.

Jumlah seluruh benda uji, $n = 30$

Jumlah kelompok benda uji yang dibandingkan $-z : z = 2$
Derajat kebebasan $- \gamma_1, \gamma_2$ berdasarkan Persamaan (5)

$$\gamma_1 = z - 1 = 2 - 1 = 1$$

$$\gamma_2 = n - z = 30 - 2 = 28$$

Perhitungan nilai penolong dari kelompok benda uji tanpa perlakuan permukaan (kelompok benda uji 1) dan kelompok benda uji yang mengalami *shot peening*

Tabel 4. Hasil percobaan benda uji tanpa perlakuan dan benda uji yang mengalami *shot peening* dengan intensitas 15 A

Benda Uji Tanpa Perlakuan			Benda Uji Setelah Shot Peening I: 15 A		
No	Jumlah siklus ($N_{1,i}$)	Log $N_{1,i}$	No	Jumlah siklus ($N_{2,i}$)	Log $N_{2,i}$
1	30.500	4,48	1	38.467	4,59
2	32.200	4,51	2	39.862	4,60
3	42.800	4,63	3	42.852	4,63
4	44.100	4,64	4	48.034	4,68
5	45.500	4,66	5	78.727	4,90
6	35.078	4,55	6	62.600	4,80
7	44.450	4,65	7	65.500	4,82
8	51.973	4,72	8	77.700	4,89
9	52.996	4,72	9	81.400	4,91
10	83.982	4,92	10	99.000	5,00
11	19.702	4,29	11	104.383	5,02
12	32.011	4,51	12	113.321	5,05
13	32.092	4,51	13	114.344	5,06
14	34.387	4,54	14	117.892	5,07
15	36.705	4,56	15	142.452	5,15
Log $N_{1,i}$ rata-rata		4,59	Log $N_{2,i}$ rata-rata		4,88

dengan intensitas 15 Almen (kelompok benda uji 2) ditampilkan pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Nilai pengujian dihitung dari rumus (9) :

$$F_{uji} = \frac{\gamma_2 \cdot \sum [n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2]}{\gamma_1 \sum (\Delta x)_i^2}$$

$$= \frac{28 \cdot [15(4.59 - 4.74)^2 + 15(4.88 - 4.74)^2]}{1 \cdot 0,05}$$

$$= 12,63$$

Besar nilai $F_{\gamma_1, \gamma_2, c}$ diketahui dari Gambar 3 dan menunjukkan probabilitas dengan tingkat kepercayaan $C = 95\%$ yaitu:

$$F_{\gamma_1, \gamma_2, c} = F_{1, 28, 95\%} = 4,2$$

Pada pengujian ini $F_{uji} > F_{\gamma_1, \gamma_2, c}$ sehingga dapat dinyatakan bahwa perlakuan *shot peening* dengan intensitas 15 A memiliki pengaruh yang signifikan terhadap umur fatik dengan probabilitas tingkat kepercayaan 95 %. Terbukti bahwa dua kelompok benda uji tersebut merupakan dua distribusi yang memiliki nilai rata-rata yang berbeda serta berasal dari dua distribusi yang berbeda.

Prosedur perhitungan untuk perbandingan hasil pengujian dari kelompok-kelompok benda uji berikutnya dilakukan indentik dengan prosedur perhitungan contoh di atas. Hasil perhitungan analisis varian untuk benda uji hasil *shot peening* dengan intensitas I = 15 A dan I = 16 A serta benda uji yang telah dilakukan karburisasi diberikan dalam Tabel 7.

Tabel 5. Perhitungan nilai penolong perhitungan

Parameter	Kelompok Benda Uji 1	Kelompok Benda Uji 2
n_i	15	15
\bar{x}_i	4,59	4,88
$\sum_{i=1}^n (\Delta x)_i^2$	0,02	0,03

Keterangan :

n_i = Jumlah benda uji kelompok i

\bar{x}_i = Rata-rata logaritma jumlah siklus (umur) benda uji kelompok i

$(\Delta x)_i$ = Perbedaan nilai antara rata-rata logaritma jumlah siklus (umur) benda uji kelompok i dengan logaritma umur benda uji ke i dari kelompok i .

Tabel 6. Perhitungan nilai penolong dari gabungan kelompok benda uji 1 dan kelompok benda uji 2

Parameter	Kelompok Benda uji 1 dan 2
$n = n_1 + n_2$	30
$\bar{x} = \frac{1}{2}(\bar{x}_1 + \bar{x}_2)$	4,74
$\sum_{i=1}^n (\Delta x)_1^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta x)_2^2$	0,05

Tabel 7. Hasil perhitungan tingkat signifikan kelompok benda uji tanpa perlakuan dibandingkan dengan kelompok-kelompok benda uji yang mengalami perlakuan permukaan

No	Parameter	Hasil Uji tingkat signifikan
1	Benda uji hasil <i>shot peening</i> dengan Intensitas 15 A	Signifikan
2	Benda uji hasil <i>shot peening</i> dengan Intensitas 16	Signifikan
3	Hasil karburisasi	Signifikan

Pengujian Statistik Antara Kelompok Benda Uji yang Dilakukan Proses *Shot Peening*

Fenomena yang menarik adalah pilihan dalam rangka peningkatan kekuatan fatik benda uji dengan melakukan *shot peening* selama 7,5 menit pada intensitas $I = 15A$ (benda uji kelompok 1) atau 15 menit dengan intensitas $I = 16 A$ (benda uji kelompok 2). Justifikasi parameter yang diberikan berpengaruh terhadap kekuatan fatik benda uji masih sukar dilakukan hanya dengan mengamati data-data hasil uji fatik dan hasil transformasinya yang dimuat pada tabel uji atau kurva S-N. Hal tersebut terutama disebabkan oleh distribusi data umur (jumlah siklus) dari kedua kelompok benda uji saling berpotongan dan bersinggungan, bahkan pada hasil pengujian fatik ini, distribusi data-data dari benda uji kelompok 1 tercakup dalam rentang distribusi data benda uji kelompok 2.

Pengujian statistik sangat diperlukan pada kondisi tersebut, sehingga dilakukan perhitungan terhadap dua kelompok benda uji ini dengan prosedur perhitungan serupa perhitungan terdahulu.

Jumlah seluruh benda uji – $n : n = 27$

Jumlah kelompok benda uji yang dibandingkan

$$-z : z = 2$$

Derajat kebebasan – γ_1, γ_2

$$\gamma_1 = z - 1 = 2 - 1 = 1$$

$$\gamma_2 = n - z = 27 - 2 = 25$$

Hasil-hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 8, Tabel 9 dan Tabel 10.

Nilai pengujian dihitung dari :

$$F_{uji} = \frac{\gamma_2 \cdot \sum [n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2]}{\gamma_1 \sum (\Delta x)_i^2}$$

$$= \frac{25 \cdot [15(4.88 - 4.74)^2 + 12(4.97 - 4.74)^2]}{1 \cdot 0,96}$$

$$= 1,43$$

Besar nilai uji $F_{\gamma_1, \gamma_2, c}$ diketahui dari Gambar 3 dan menunjukkan probabilitas dengan tingkat kepercayaan $C = 95\%$ yaitu $F_{\gamma_1, \gamma_2, c} = F_{1, 28, 95\%} = 4,2$

Tabel 8. Hasil percobaan dari benda uji yang di *shot peening*

Benda uji setelah dilakukan <i>shot peening</i> selama 7,5 menit, I: 15 A			Benda Uji Setelah dilakukan <i>shot peening</i> selama 15 menit, I: 16 A		
No	Jumlah siklus ($N_{1,i}$)	Log $N_{1,i}$	No	Jumlah siklus ($N_{2,i}$)	Log $N_{2,i}$
1	38.467	4,59	1	34.690	4,54
2	39.862	4,60	2	36.776	4,57
3	42.852	4,63	3	43.036	4,63
4	48.034	4,68	4	55.295	4,74
5	78.727	4,90	5	89.724	4,95
6	62.600	4,80	6	87.000	4,94
7	65.500	4,82	7	119.400	5,08
8	77.700	4,89	8	146.300	5,17
9	81.400	4,91	9	151.700	5,18
10	99.000	5,00	10	263.800	5,42
11	104.383	5,02	11	124.585	5,10
12	113.321	5,05	12	192.149	5,28
13	114.344	5,06			
14	117.892	5,07			
15	142.452	5,15			
Log $N_{1,i}$ rata-rata		4,88	Log $N_{2,i}$ rata-rata		4,97

Tabel 9. Perhitungan nilai penolong tiap kelompok benda uji

n_i	15	12
\bar{x}_i	4,88	4,97
$\sum_{i=1}^n (\Delta x)_i^2$	0,03	0,93

Tabel 10. Perhitungan nilai penolong dari gabungan kelompok benda uji

$n = n_1 + n_2$	27
$\bar{x} = \frac{1}{2}(\bar{x}_1 + \bar{x}_2)$	4,925
$\sum_{i=1}^n (\Delta x)_1^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta x)_2^2$	0,96

Pada pengujian ini $F_{uji} < F_{\gamma_1, \gamma_2, c}$, yang berarti perpanjangan waktu pada perlakuan *shot peening* dari 7,5 menit menjadi 15 menit tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan umur fatik dengan probabilitas tingkat kepercayaan 95%, sehingga perpanjangan waktu tersebut tidak perlu dilakukan. Kedua kelompok benda uji tersebut walaupun memiliki nilai rata-rata yang berbeda tetapi setelah dilakukan perhitungan statistik ternyata berasal dari satu kelompok distribusi logaritma normal. Perbedaan kekuatan fatik akibat perbedaan waktu *shot peening* lebih disebabkan oleh faktor random dari sebaran distribusi umur fatik benda uji.

Dari perhitungan ini secara tegas dapat dinyatakan bahwa perpanjangan waktu proses *shot peening* dari 7,5 menit menjadi 15 menit tidak berpengaruh terhadap peningkatan kekuatan fatik benda uji, sehingga tidak perlu dilakukan, dengan demikian dapat dilakukan penghematan waktu, energi dan ongkos produksi.

KESIMPULAN

Dari hasil percobaan dan perhitungan diatas dapat disimpulkan, sebagai berikut :

1. Pengujian statistik sangat membantu dalam penentuan pengaruh suatu variabel perlakuan permukaan terhadap kekuatan bahan.
2. Perlakuan *shot peening* dan karburisasi meningkatkan kekuatan fatik secara signifikan.
3. Perpanjangan waktu *shot peening* dan peningkatan intensitas *peening* dari I = 15 A menjadi I = 16 A tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kekuatan fatik.

DAFTAR ACUAN

- [1]. H. GUDEHUS and H. ZENNER, *Leitfaden für eine Betriebsfestigkeits-rechnung*, VBFeh, VDEh, Düsseldorf (1995).
- [2]. C. E. FELTNER, *Basic Research on the Cyclic Deformation and fracture Behavior of Materials*, Manual on Low Cycle Fatigue STP 465 (1969).
- [3]. D. T. RASKE and J. MORROW, *Mechanics of Materials in Low Cycle Fatigue Testing*, Manual on Low Cycle Fatigue STP 465 (1969)
- [4]. H. MAUCH and H. ZENNER, *Lebensdauer statistik, Leitfaden zur Statistik in der Betriebsfestigkeit*, Forschungs Heft, Forschungsvereinigung Antriebstechnik. E.V. (FVA) Forschungsvorhaben Nr 304, (1999)
- [5]. R. C. RICE, *Statistics and Data Analysis, Mechanical Testing*, ASM Hand Book Volume 8, USA (1997)
- [6]. E. KREYSZIG, *Statistische Methoden und ihre Anwendungen*, Vandenhoeck und Ruprecht, Goettingen (1972)
- [7]. H. G. KOEBLER, *Ueber die Trennscharfe statistisch ausgewerteter Versuchsreihen*, LBF Darmstadt, Technische Mitteilungen 87/81, Darmstadt (1981).
- [8]. U. GRAF, H.J. HENNING, K. STANGE and P.T. WILRICH *Formeln und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik*, Springer Verlag, Berlin (1987)
- [9]. P. BAILEY and J. CHAMPAIGNE, *Factors That Influence Almen Strip Arc Height*, Shot Peener, Conf Proc: ICSP-9 (pp 392-399), Indiana, USA (2005)
- [10]. The Shot Peener, *Almen Strip Consistency Testing*, Vol 23/ Issue 1, Indiana, USA, (2009)
- [11]. H. OSTERMANN and W. SCHUETZ, *Einfluss unterschiedlich hoher und haeufiger Vorbelastungen auf die Schwingfestigkeit gebohrter Flachstaebe aus ST 37 Teil A: Woehlerversuche*, LBF Bericht Nr. FB-53 (1964)
- [12]. O. BUXBAUM, *Betriebsfestigkeit*, Verlag Stahleisen, Duesseldorf (1986)